

氏名・(本籍)	すな 砂	おし 押	ひとし 仁
学位の種類	博 士 (理 学)		
学位記番号	理博第1296号		
学位授与年月日	平成5年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程)原子核理学専攻		
学位論文題目	イオントラップとレーザー・マイクロ波二重共鳴法によるSr ⁺ の超微細構造の研究		
論文審査委員	(主査) 教 授 藤 岡 学		
		教 授 藤 平 力	教 授 笠 木 治郎太

論 文 目 次

第一章	序 論
第二章	基礎理論
第三章	実験装置と実験方法
第四章	実験結果と考察
第五章	まとめと今後の展望
	謝辞
	参考文献

論文内容要旨

原子核の持つ電磁気モーメントと軌道電子による電磁場との間の相互作用は、原子スペクトルの超微細構造 (hyperfine structure=HFS) を引き起こすので、超微細相互作用 (hyperfine interaction=HFI) と呼ばれている。HFI による原子準位エネルギーのシフトは、実験的な外場が無い孤立原子系の場合、電子スピン $J \neq 0$, 核スピン $I \neq 0$ の時に $W_F = KA/2$ で与えられる。但し $K = F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)$, $F = I+J, I+J-1, \dots, |I-J|$ 。 A は超微細構造定数 (hyperfine structure constant=HFC) と呼ばれ、 $A = \int \bar{\mu}_i(r_N) \cdot \bar{B}_{\text{eff}}(r_N) dV_N / IJ$ で定義される量で、核磁気モーメントと電子が作る磁場との積の形になっている。今、原子核の大きさを考えず点状核磁気モーメントを用いると、2つのアイソトープ(1), (2)について、 $\frac{A^{(1)} I^{(1)}}{\mu_i^{(1)}} = \frac{A^{(2)} I^{(2)}}{\mu_i^{(2)}}$ の関係があり、 $A^{(1)}, I^{(1)}, \mu_i^{(1)}, I^{(2)}$ を既知とすれば、 $A^{(2)}$ から $\mu_i^{(2)}$ を知ることができる。この関係は原子核の大きさを考えた場合には成立しない。これを超微細構造異常 (hyperfine anomaly=HFA) と呼ぶ。 A と μ_i を2つ以上のアイソトープについて、独立にしかも 10^{-5} 以上の精度で測定すれば、核内の磁化分布研究の可能性が開ける [1], 現在、安定核に対してこれらの量は数多く測定されているが、不安定核のデータはほとんどない [2]。そこで考え出された方法がイオントラップとオンライン同位体分離装置 (ISOL) との組み合わせである。イオントラップとは、荷電粒子を有限の3次元空間に電磁的に閉じ込める装置で、核モーメントや HFC を精度良く測ることができる。閉じ込め方によってペニングトラップ (静電場と静磁場) と RF トラップ (静電場と交流電場) に分類される。一方 ISOL は、核反応によって生成した短寿命核を、素早くかつ効率良くトラップへ導く装置であり、これら二つの装置を組み合わせることで、今まで測定が難しかった領域まで足を踏み入れることが可能となる。

本研究の目的は、「イオントラップと ISOL を組み合わせ、レーザー・マイクロ波二重共鳴法による超微細構造の精密測定手段を確立し、特に $^{87}\text{Sr}^+$ について、基底状態の HFC の高精度の実験値を得、不安定 Sr^+ への拡張を目指すこと」である。イオントラップと二重共鳴法を組み合わせた分光法には次のような特徴がある。1) 高感度。1個のイオンを繰り返し測定できる。2) 超高精度。相互作用時間を長くすることができ、HFS をマイクロ波で直接精度良く測定できる。3) ドップラーフリー。いわゆる Lamb-Dicke の条件 [3], [4] を満たすことができる為、ドップラー効果 (1次) に邪魔をされない分光が可能。

図1に $^{87}\text{Sr}^+$ の基底準位付近のエネルギー準位図を示す。 $^{87}\text{Sr}^+$ の基底状態 ($I=9/2, J=1/2$) は、HFI によって $F=4$ と $F=5$ の二つの状態に分裂し、本実験ではこの分裂の大きさ ν_0 を高精度で測定した。HFS は地磁気などの弱い外場中では更に磁気サブレベル (Zeeman レベル) に分裂する。サブレベル間の許容遷移27本のうち、 $|F=4, m_F=0\rangle \leftrightarrow |F=5, m_F=0\rangle$ の遷移 (以下0-0遷移) が弱い外場中では1次で磁場から独立であるので、これを ν_0 の測定に利用した。なお $\Delta m_F = \pm 1$ の遷移は本実験の分解能では分けることができず、19本が分離観測可能である。

本研究で用いたイオントラップ (RF型) による分光システムは、本大学のサイクロトロン RI

センターの第2ターゲット室に設置され、ISOLと接続されている。 $^{87}\text{Sr}^+$ は、今回新たに製作されたISOL用表面電離型イオン源[7]でイオン化され、質量分離した後、トラップ内部のPtフォイルにインプラントし、再び表面電離効果によってイオン化してトラップした。図2にトラップ電極の断面図を示す。リング電極と2つのキャップ電極の間に数Vの直流電圧と数百V、数百kHzの交流電圧をかけてできるポテンシャルの中にイオンを閉じ込める。バッファガス冷却と準安定準位($^2\text{D}_{3/2}$)緩和の為、トラップ中には 10^{-6} mbar程度の H_2 ガスを導入した(バックグラウンド真空 10^{-10} mbar)。このようにトラップされた $^{87}\text{Sr}^+$ に、基底状態($^2\text{S}_{1/2}$)の $F=4$ のイオンのみを $^2\text{P}_{1/2}$ へ励起するようにレーザーの波長を選んで照射し、同時にHFS間の遷移を誘導する為のマイクロ波をその周波数を掃引しながら照射する。

これまでに $^{87}\text{Sr}^+$ のHFCは 2×10^{-6} の精度まで測定されている[8]。この精度は原理的に充分改良の余地がある。又、不安定核の測定を目指すには、S/Nと検出効率を良くすることが必須で、これはまた、 ν_0 の精度を上げることに繋がる。本研究では今までの装置の改良を行い、精度向上を目指した。1) 遮光板等によるバックグラウンドの抑制を行い、以前の約1/100に改善された。2) 外場によって27本のピークに分散している強度を、磁場を消去して1本に集中できれば統計精度が飛躍的に良くなる筈である。外場消去の為に、3次元のHelmholtzコイルを製作した。3) ISOL用イオン源としてこれまでのNielsen型から表面電離型に変更した[7]。イオン化引き出し効率が 10^{-2} へと向上し、長時間安定した運転が可能となった。以上の様な改良を行い二重共鳴法の測定を行って得たスペクトルが図3である。地磁気などの迷磁場($\sim 0.6\text{G}$)の下で27本のピークは約3MHzの範囲に分布するが、Helmholtzコイルによって外場を約1/3にまで小さくできた(図3(a), 1.3kHz/ch)。ピークは約1MHzの範囲に分布している。マイクロ波には掃引間隔の荒さを補う為、周波数変調(FM)をかけた。19本の細いピークとやや幅の広い20本のピークが1本おきに観測された。19本のピークの中央付近を100Hz/chの掃引間隔で観測したスペクトルが図3(b)である。FMはかけていない。右側の細いピークが0-0遷移に対応する。細いピークの両脇にある幅の広いピークは、イオンの運動に伴うサイドバンドである。RFトラップ中でのイオンは、孤立原子系を考えると、電極の大きさや電圧、交流周波数で決まる角周波数 ω の調和振動を行っている。そして周波数 ω_m のマイクロ波は、運動するイオンから見るとドップラー効果によって ω で周波数変調されたように見える為、マイクロ波のパワースペクトルは、 ω_m の搬送波(キャリア)に $\omega_m \pm n\omega$ (n は自然数)の側帯波(サイドバンド)が重なったものになる。実際のイオンの運動は、空間電荷効果等が原因で完全な調和振動ではないので、サイドバンドは幅の広いピークとして観測される。図3(b)では、キャリアと側帯波の間隔が狭い為、両方のサイドバンドが重なっていると考えられる。

0-0遷移ピークの中心周波数は、ガウス分布によるピークフィットの結果 $\nu_{\text{obs}}=5,002,368,378$ (41)Hzが得られた。 ν_{obs} から $^{87}\text{Sr}^+$ の超微細分裂周波数 ν_0 を得る為に、 $\nu_0 = \nu_{\text{obs}} + \Delta\nu_{\text{shift}} + \Delta\nu_{\text{syn}}$ の補正を行った。 $\Delta\nu_{\text{shift}}$ は外場による周波数のシフト(2次以上)[9]、 $\Delta\nu_{\text{syn}} (= -3\text{Hz})$ は周波数シンセサイザーの絶対値の補正である。シンセサイザーの校正は、計量研究所の

Cs 周波数標準器を用いて行った。表 1 に二重共鳴による実験の 5 回分の結果についてまとめた。どれも FM はかけていない。 ν_0 について 5 回の加重平均をとり、シンセサイザーのスイッチングタイムに由来する系統誤差の評価値 $\pm 30\text{Hz}$ を統計誤差 ($\pm 27\text{Hz}$) に加え、最終的に、

$$\nu_0 = 5,002,368,363 \pm 57\text{Hz} \quad (\chi^2 = 1.020)$$

を得た。又、 $\nu_0 = W_{F=4} - W_{F=5} = -5A$ の関係を使って HFC の値を $A = -1,000,473,673 \pm 11\text{Hz}$ と決定した [10]。得られた精度は $\Delta A/A = 1 \times 10^{-8}$ で、将来の HFA の研究には十分であり、また本システムによって得られる限界に近い値と考えられる。表 2 にこれまでの $^{87}\text{Sr}^+$ の HFS 測定 of 歴史的変遷をまとめた。前回に比べ精度が 200 倍良くなった理由は、ノイズ対策によるバックグラウンドの減少、マイクロ波掃引間隔を小さくし FM をかけなくてすんだ、外場の向きと大きさを制御したこと等が挙げられる。

このように本研究では、実験の精度が良くなるに従って、トラップ中でのイオンの運動や電磁場との相互作用についてさまざまな情報を得ることができたのも成果の一つである。そして本装置は、レーザー・マイクロ波二重共鳴法による超微細構造の精密測定的手段として確立されたものとする。今後はこの手段を不安定 Sr^+ へ拡張し系統的な HFS 測定を目指す。現在それに向けてトラップ電極や検出系の改造を行っている。又、 $^{90}\text{Zr}(p, \alpha \text{pn})^{86}\text{Sr}$ 反応を使った $^{86}\text{Sr}^+$ ($T_{1/2} = 65\text{d}$) の生成実験も行っている [7]。

参考文献

- [1] S. Büttgenbach, *Hyp. Int.* 20 (1984) 1.
- [2] F. Arbes et al., *Nucl. Inst. Meth.* B70 (1992) 494.
- [3] W. E. Lamb, Jr, *Phys. Rev.* 55 (1939) 190.
- [4] R. H. Dicke, *Phys. Rev.* 89 (1953) 472.
- [5] C. E. Moore, *Atomic energy levels II* (1952) 189.
- [6] C. M. Lederer and V.S. Shirley, *Table of Isotopes 7* (1978) 326.
- [7] 古川雅昭, Master's thesis, 東北大学, (1992).
- [8] Y. Fukashiro et al., *Hyp. Int.* 74 (1992) 41.
- [9] G. Breit and I.I. Rabi, *Phys. Rev.* 38 (1931) 2082.
- [10] H. Sunaoshi et al., to be published in *Hyp. Int.*
- [11] F. Buchinger et al., *Phys. Rev.* C41 (1990) 2883.
- [12] 和田道治, PhD thesis, 東北大学, (1990).

Allowed transitions 27

($\Delta m_F = 0, \pm 1$)

Observed peaks 19

(coincide in a weak field)

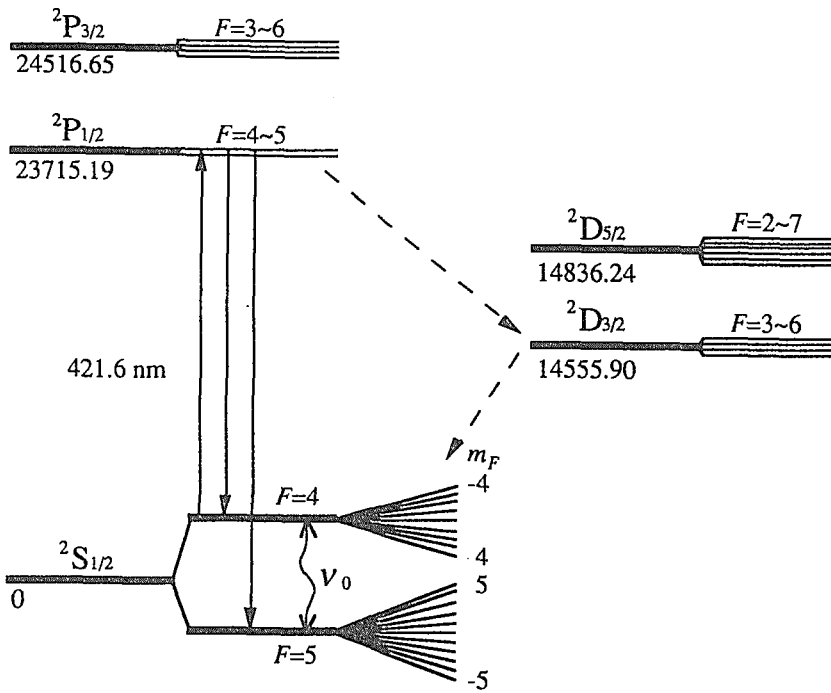


图 1. Low-lying states of $^{87}\text{Sr}^+$.

The number below the term symbol is the energy of the level in cm^{-1} [5]. The nuclear spin of the ground state of ^{87}Sr is known to be $I=9/2$ [6].

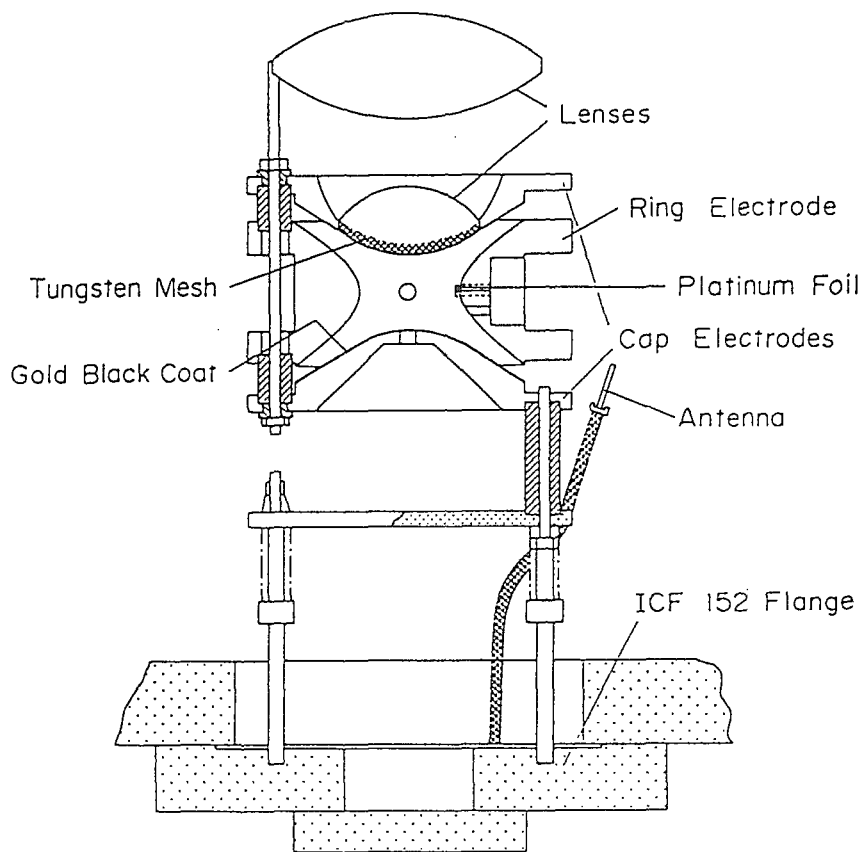


図2. トラップ電極の断面図

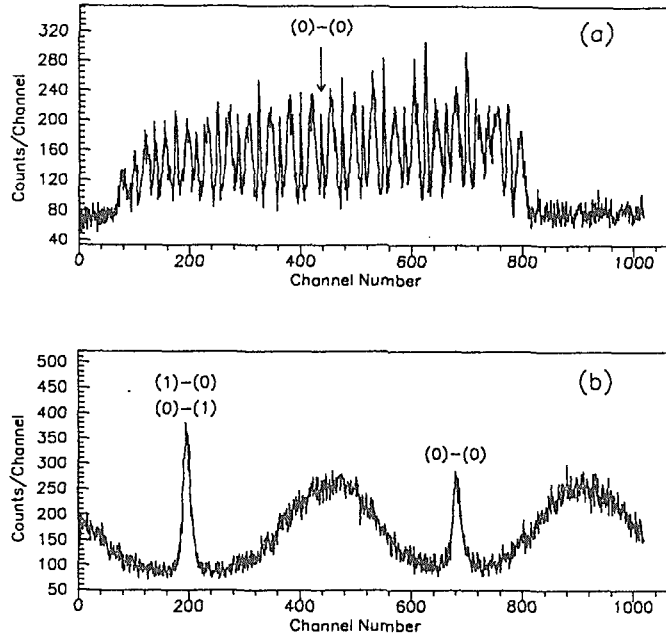


图 3. Microwave resonance spectra of $^{87}\text{Sr}^+$.

Assignments of magnetic quantum numbers are indicated. Laser frequency is fixed to the $F=4$ state. The horizontal axis corresponds to the microwave frequency. Stray magnetic field intensity is 0.174 G. (a) starting frequency is 5,001,800.000 kHz, and the step is 1.3 kHz (3 kHz modulation), and (b) starting frequency is 5,002,300.000 kHz and the step is 100 Hz (no modulation).

表 1. Experimental results of the 0-0 transition.

	ν_0 (kHz)	χ_n^2	step (Hz/ch)	B (G)	$\Delta \nu_{\text{shift}}$ (Hz)
1	5,002,368.351 (41)	1.274	100	0.174	-24
2	5,002,368.61 (21)	0.983	300	0.210	-35
3	5,002,368.329 (62)	1.132	200	0.214	-36
4	5,002,368.336 (56)	1.413	200	0.246	-48
5	5,002,368.475 (77)	1.045	200	0.276	-60

表 2. $^{87}\text{Sr}^+$ の超微細構造研究の歴史.

year	ν_0 (MHz)	$\Delta \nu / \nu_0$	測定方法	Ref.
1990	5002.5 (5.0)	1×10^{-3}	レーザー分光	[11]
1991	5002.40 (0.14)	3×10^{-5}	二重共鳴	[12]
	5002.354 (0.012)	2×10^{-6}	二重共鳴	[8]
1992	5002.368363 (0.000057)	1×10^{-8}	二重共鳴	present, [10]

論文審査の結果の要旨

砂押仁提出の論文は、イオントラップ、レーザー及びマイクロ波等の高度の技術を駆使して、 Sr^+ イオン、特に同位体分離装置によって選別された $^{87}\text{Sr}^+$ イオンをイオントラップ内に閉じ込め、これにレーザーとマイクロ波を同時に照射する、いわゆる二重共鳴法を用いて $^{87}\text{Sr}^+$ の $^2\text{S}_{1/2}$ 基底状態にみられる超微細構造のエネルギー ΔW に相当する周波数 $\nu_0 = \Delta W/h$ を超高精度で測定したことを記している。

即ち、論文ではイオントラップ内でのイオンの運動を記述する理論について解説し、安定なトラップに対する必要条件を示し、次に原子核とそのまわりの電子の間に作用する超微細相互作用によって $^{87}\text{Sr}^+$ の $^2\text{S}_{1/2}$ 基底準位の全スピン F が 4 及び 5 の 2 本に分裂（超微細構造）する様子を記している。この場合、磁気双極型相互作用のみがはたらき、 $F=4$ と 5 の間の分裂エネルギー ΔW に相当する ($\Delta W = h\nu_0$) 周波数 ν_0 の超高精度の測定が本論文の研究目的である。更には天然に存在しない放射性アイソトープイオン $^{85,86}\text{Sr}^+$ の ΔW を近い将来測定するに必要な高度の技術レベルを確立することをも目指している。

本論文における最も重要な仕事は使用する機器の状態の改善を行うことによってレーザー光がトラップイオン以外の部分から散乱される迷光を減少せしめ、もって ν_0 測定における S/N 比を大巾に（約10倍）向上せしめたことにある。即ち、トラップ空間へレーザーを導くパイプ内に多重オリフィスをもうけ、また、レーザー光のトラップへの導入経路の改善、及び周波数シンセサイザーの Cs 標準器（計量研究所）による校正、シンセサイザー周波数のスイープ並びにデータとりこみ処理の改善等々である。また、これまで測定障害となってきた迷磁場をコントロール、減少せしめたことにより、きめ細かなスイープが可能となったため、迷磁場によるゼーマン分裂線とそれに伴うサイドバンドのバンプの区別が確実になり、いわゆる $0-0$ 転移 (ν_0 : $\Delta m=0$) の同定が確実になった。

以上の諸改良を行ってはいじめて良質のデータを取ることが可能となり、 $\nu_0 \equiv \Delta W/h$ の値として、

$$\nu_0 = 5,002,368,363 \pm 57 \text{ Hz}$$

という、相対誤差がわずか 1×10^{-8} という超高精度の値を決定することができた。これはこれまでの値よりも200倍もの精度改善を意味する。この値は ν_0 は $^{87}\text{Sr}^+$ の $^2\text{S}_{1/2}$ 基底状態に関する基本的物理量の一つであるが、これにより将来の Sr アイソトープの核磁気能率の測定と合わせて、いわゆるポーア・ワイスコップ効果を定め、Sr 核内磁化の分布の研究が可能となった。また、 $^{87}\text{Sr}^+$ の ν_0 の値そのものを周波数副標準として利用する道を開いたことの意義も大きい。

以上のように、本論文は、本人が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。

よって、砂押仁提出の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。